УДК 622.44 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-102-108

Обоснование срока службы вентиляторов главного проветривания в условиях переменной нагрузки

Копачев В. Ф.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: u1331@yandex.ru

Реферат

Цель работы. *Исследование основных закономерностей изменения функционального состояния вентиляторов главного проветривания, входящих в состав главных вентиляторных установок, в зависимости от технологических условий эксплуатации. Установление нормативного срока службы вентиляторов главного проветривания с учетом дифференцированного анализа разрушающих факторов, конструктивных особенностей, интенсивности и режимов эксплуатации вентиляторных комплексов.*

Методика проведения исследований. *На основании анализа структуры главных вентиляторных установок и дифференцированного учета технологических факторов, влияющих на функциональную эффективность вентиляторов главного проветривания, предложена математическая модель определения нормативного и остаточного ресурса работы вентилятора главного проветривания с учетом переменной нагрузки.*

Результаты и их анализ. *В результате исследования воздействия деструктивных факторов на основные функциональные узлы вентилятора главного проветривания предложено уравнение, учитывающее физические свойства материала, из которого изготовлены элементы вентилятора и численное влияние внешних физических факторов на эксплуатацию машины. Результаты исследования показывают, что ресурс вентиляторов главного проветривания следует определять исходя из долговечности работы крупного узла машины – коренного вала, с учетом режима работы машины.*

Выводы и область применения результатов. *Схемные решения комплексов шахтных вентиляторных установок предопределяют срок службы вентиляторов главного проветривания, который должен устанавливаться на стадии рабочего проектирования с учетом дифференцированного анализа разрушающих факторов, конструктивных особенностей, интенсивности и режимов эксплуатации вентиляторных комплексов. Предлагаемая методика расчета остаточного ресурса вентиляторов главного проветривания находит применение в экспертных организациях и Методических указаниях по определению остаточного ресурса шахтных вентиляторов главного проветривания, работающих с превышением нормативного срока эксплуатации. Также указанная методика может быть использована проектными организациями для определения проектных сроков службы сооружаемых главных вентиляторных установок.*

Ключевые слова: *вентилятор; главная вентиляторная установка; остаточный ресурс; расчет надежности; вентилятор главного проветривания; математическое моделирование; схемы вентиляторов; эксплуатация вентиляторов.*

Цель работы. Вентиляторная установка является ключевым элементом в сложной многосвязной системе всего комплекса горного предприятия, от которого зависит безопасность ведения горных работ. Реализация эффективной с точки зрения безопасности эксплуатации комплексов главных вентиляторных установок (ГВУ) не может быть осуществлена без комплекса исследований, направленных на прогноз технического состояния оборудования и обоснования фактического остаточного ресурса и нормативных сроков службы вентиляторов главного проветривания (ВГП) [1, 2].

В сложившейся практике проектирования и эксплуатации ГВУ вопросам обоснования и обеспечения нормативных сроков службы ВГП не уделяется должного внимания, что нередко является причиной преждевременного выхода вентиляторов из строя. Нормативные сроки службы шахтных ВГП не учитывают фактические условия их эксплуатации, амплитуду изменения нагрузок и их цикличность, а также состояние вспомогательных узлов и агрегатов. Таким образом, выходит, что технический вопрос эксплуатации машины решается директивным методом [3].

Современное состояние развития науки и техники обуславливает создание дифференцированного подхода к оценке срока службы ВГП, учитывающего многообразие условий эксплуатации и особенности конструкции. Такой подход отражает общую тенденцию современного технического обслуживания горных машин и комплексов по их состоянию, когда наработка или календарный срок службы не являются основополагающим критерием, посредством которого ранее оценивалось техническое состояние объекта и его остаточный ресурс работы [4].

В настоящее время оценка остаточного ресурса ВГП проводится по результатам дефектоскопии их основных узлов, визуального и инструментального обследования и на основании данных о сроке эксплуатации и режимах работы установки. Для достоверной оценки остаточного ресурса необходимо учитывать динамические свойства и характеристики элементов вентилятора, которые возникают в процессе эксплуатации, причем за весь период его эксплуатации. Поэтому первоочередное значение в настоящее время должны получить достоверные методы расчета общей фактической и остаточной пригодности (ресурса) ВГП, которые должны базироваться на фактических параметрах интенсивности эксплуатации установки с обязательным учетом уровней агрессивного воздействия внешней среды и других вредных факторов [2, 4, 5].

Методика проведения исследований. Поверхностные комплексы ГВУ являются сложными системами. Элементы поверхностного комплекса ГВУ находятся в постоянном взаимодействии друг с другом и с внешней средой: коренной вал взаимодействует с рабочим колесом, рабочее колесо взаимодействует с воздушным потоком, воздушный поток воздействует на направляющий аппарат, и т. д.

В процессе эксплуатации ГВУ происходит ухудшение их технико-экономических показателей под воздействием внутренних и внешних дестабилизирующих факторов [6].

К внутренним дестабилизирующим факторам, присущим самим объектам поверхностных комплексов ГВУ, относят:

– износ оборудования и старение материала основных узлов, приводящие к снижению производительности и надежности, увеличению потребления электроэнергии и затрат на поддержание узлов оборудования в требуемой кондиции;

– плановое развитие фронта горных работ и связанное с ним увеличение производительности и давления вентилятора.

К внешним дестабилизирующим факторам, которые обусловлены средой функционирования ГВУ, относят:

– увеличение агрессивности внешней среды;

– изменение технологических требований и условий вентиляции рудника, связанное с модернизацией предприятия и соответствующим отклонением от расчетных значений функционирования ВГП как по аэродинамическим параметрам, так и по схемному решению поверхностного комплекса ГВУ.

Основной базовой структурной единицей вентилятора главного проветривания является коренной вал, и его разрушение означает замену всей машины, т. е. по сути дела состояние вала определяет технический ресурс вентилятора.

На определенной стадии действия циклических нагрузок, которым подвергаются валы вентиляторов, в местах вала, где циклические напряжения достигают больших значений (галтели, надрезы, участки шероховатости, места структурных дефектов металла и т. п.), могут возникать и прогрессивно развиваться трещины усталости, которые постепенно приводят к усталостному разрушению вала [7, 8].

Следует отметить, что в настоящее время в технической литературе нет рекомендаций и методик расчета деталей машин на долговечность, учитывающих процессы коррозии поверхностных слоев металла. Но так как процессы коррозии протекают во времени, такие методики могут быть разработаны. К числу внешних факторов, также влияющих на условия эксплуатации ГВУ, следует отнести: средний уровень и амплитуду изменения температуры и атмосферного давления, влажность воздуха и среднее количество атмосферных осадков, а также скорость и направление ветра. Естественно, что воздействие климатических факторов и химической агрессивности вентиляционных потоков на работоспособность и долговечность машин носит комплексный характер и далеко не всегда может быть определено в явной форме. Поэтому для оценки степени влияния указанных факторов на долговечность ГВУ в первом приближении плодотворным может оказаться также и их раздельное рассмотрение.

Результаты и их анализ. Методика определения остаточного ресурса вентилятора главного проветривания описывается технологическим графом (рис. 1). Дестабилизирующие факторы (ДФ) воздействуют на основные элементы ВГП – коренной вал (КВ), рабочее колесо (РК), регулирующие элементы (РЭ) и т. д. Определение остаточного ресурса ВГП предложено производить по фактору усталостной прочности основных неремонтопригодных узлов вентиляторов – коренных валов. При этом остаточный ресурс вентилятора по фактору усталостной прочности рассчитывается исходя из фактических циклов нагружения вала вентилятора в прогнозируемом периоде с учетом всех дестабилизирующих факторов [9, 10], (*Методические указания по определению остаточного ресурса вентиляторов главного проветривания, работающих с превышением нормативного срока эксплуатации / С. А. Тимухин, В. Ф. Копачев и др. // Согласовано с управлением государственного горного и металлургического надзора РФ. Москва, письмо № 13-07/2047 от 16.08.07. 2009. 25 с.*).

Расчет теоретического допустимого числа циклов нагружения $N_т$ вала ВГП до разрушения производится с учетом следующих факторов: определения величины критической частоты вращения $\omega_{кр}$ вала разными методами ($\omega_{кр1}$, $\omega_{кр2}$) – с последующим сравнением и анализом полученных результатов; значений параметров вибрации, полученных за последние 2–3 экспертных обследования главной вентиляторной установки; химической и физической агрессивности исходящих вентиляционных потоков $K_к$; коэффициента асимметричности нагрузочного цикла $K_ц$ на основе учета суммарных опорных реакций отдельно от вращающихся и невращаюшихся нагрузок, динамического коэффициента, учитывающего увеличение прогиба вала при приближении к резонансной частоте, напряжения в опасных сечениях от вращающихся и невращающихся нагрузок σ'_{max} и σ'_{min}, спектра напряжений нагрузочного цикла; коэффициента надежности $K_з$, фактического времени работы ВГП до экспертного обследования $T_ф$, допустимого числа циклов вала до разрушения $N_{доп}$ и допустимого остаточного числа циклов $N_{ост}$; коэффициента резервирования вентиляторных агрегатов $K_р$.

Изложенный в Методических указаниях подход предполагает нагрузку элементов вентилятора неизменной за все время его эксплуатации (*Методические указания по определению остаточного ресурса вентиляторов главного про-*

ветривания, работающих с превышением нормативного срока эксплуатации / С. А. Тимухин, В. Ф. Копачев и др. // Согласовано с управлением государственного горного и металлургического надзора РФ. Москва, письмо № 13-07/2047 от 16.08.07. 2009. 25 с.). Однако на практике в связи с необходимостью регулирования ГВУ в течение смены, суток и года [11, 12] нагрузка на элементы ВГП, в том числе и на его коренной вал, носит переменный характер. На рис. 2 показан приведенный блок нагружения коренного вала вентилятора ВЦД-47 «Север», установленного на северном вентиляционном стволе шахты «Кельинская» ОАО «СУБР», соответствующий графику суточного регулирования вентилятора по подаче и статическому давлению.

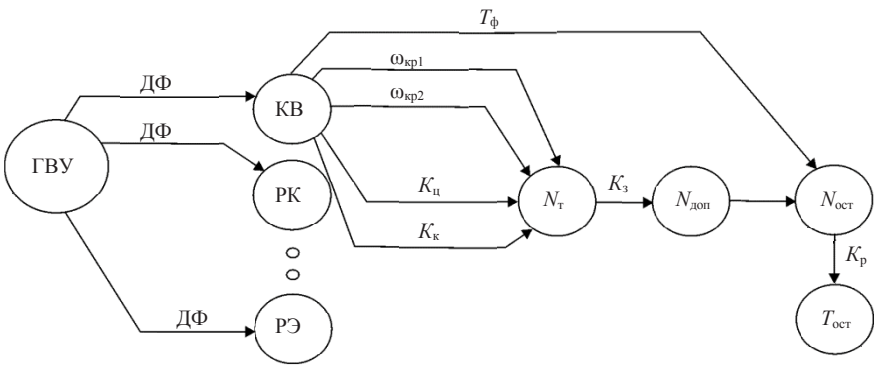

Рис. 1. Схема определения остаточного срока службы ВГП
Fig. 1. Scheme of main fan residual life determination

На основе таких графиков может быть определен характер переменного нагружения элементов вентилятора как в части величин напряжений, так и продолжительности их воздействия. Все это должно одинаково относиться как к периоду, предшествующему прогнозу, так и к самому прогнозному периоду. Согласно [7], предложенный подход предполагает, что любой элемент ВГП должен выдержать: при напряжении σ_{max1} – часть общих циклов $r_1 = N_1/\Sigma N$, при напряжении σ_{max2} – часть общих циклов $r_2 = N_2/\Sigma N$, или в общем виде: при напряжении σ_{maxi} – часть общих циклов $r_i = N_i/\Sigma N$.

Данное решение предполагает предварительное определение числа допустимых до разрушения циклов $N_{допi}$ при напряжениях σ_{maxi}, что может быть реализовано посредством методики (*Методические указания по определению остаточного ресурса вентиляторов главного проветривания, работающих с превышением нормативного срока эксплуатации / С. А. Тимухин, В. Ф. Копачев и др. // Согласовано с управлением государственного горного и металлургического надзора РФ. Москва, письмо № 13-07/2047 от 16.08.07. 2009. 25 с.*). Проведя соответствующие преобразования, получим зависимость общего допустимого числа рабочих циклов элемента ВГП, которое он в состоянии выдержать до разрушения в условиях переменной нагрузки:

$$N_{доп} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{r_i}{N_{допi}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $N_{допi}$ – допустимое расчетное число циклов по условию разрушения для i-го периода нагружения; n – число периодов нагружения.

Значение $N_{\text{доп}i}$ определяется на основе кривой усталости и фактического нагружения элемента с учетом постоянного значения нагрузки в периоде:

$$N_{\text{доп}i} = 10^{m_i} K_{\text{з}}^{-1},$$

где m_i – показатель степени, находится из выражения:

$$m_i = 14 - 7K_{\text{ц}i}\sigma_{\max i}\left(K_{\text{к}}\sigma_{-1}\right)^{-1},$$

где $\sigma_{\max i}$ – максимальное растягивающее напряжение нагрузочного цикла, учитывающее изгибающие и касательные нагружения; σ_{-1} – предел выносливости материала элемента ВГП.

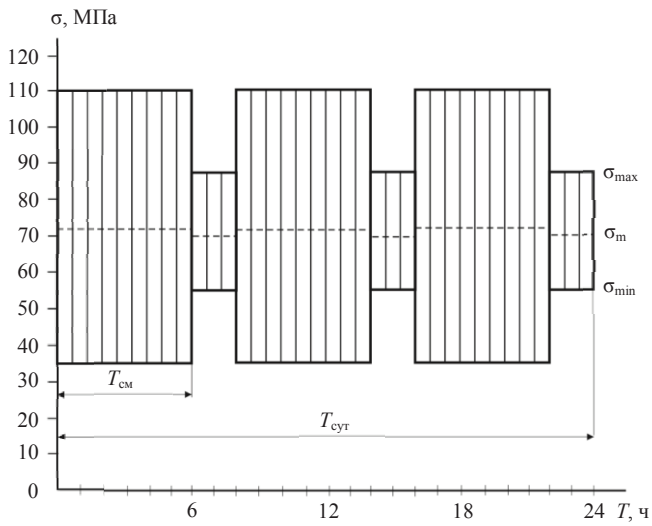

Рис. 2. Приведенный блок нагружения вала, соответствующий суточному графику подачи воздуха
Fig. 2. Reduced block of shaft load corresponding to the 24-hour time schedule of air delivery

Выводы и область применения результатов. Формула (1) позволяет определить общее число циклов, которое может выдержать элемент ВГП, в том числе и главный вал вентилятора при его переменной нагрузке.

Моделирование нагрузочного цикла на примере ГВУ с вентилятором ВЦД-47 «Север», регулируемого частотой вращения привода на глубину 0,5, согласно графику, приведенному на рис. 2, показало, что с учетом переменного характера нагружения допускаемое число циклов до разрушения его вала $N_{\text{доп}} = 3{,}59 \cdot 10^9$ (что соответствует 15,94 лет непрерывной работы вентилятора). При работе этого же вентилятора без регулирования с постоянной нагрузкой на максимальной скорости вращения вала число допускаемых циклов до его разрушения $N_{\text{доп}} = 3{,}08 \cdot 10^9$ (что соответствует 11,96 лет непрерывной работы вентилятора).

Таким образом, схемные решения комплексов шахтных вентиляторных установок предопределяют срок службы ВГП, который должен устанавливаться на стадии рабочего проектирования с учетом дифференцированного анализа разрушающих факторов, конструктивных особенностей, интенсивности и режимов эксплуатации вентиляторных комплексов. Методология определения общего фактического и остаточного ресурса ВГП должна быть основана на расчете уста-

лостной прочности основных узлов главной вентиляторной установки, что имеет достаточное теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение. Выполнение подобных расчетов в рамках комиссионных и экспертных обследований ГВУ, выявляющих их остаточный ресурс, будет способствовать стремлению горнорудных предприятий обеспечивать более рациональную нагрузку ГВУ с целью увеличения ресурса вентилятора главного проветривания. Предложенный метод может быть реализован в качестве дополнительных материалов к применяемым в настоящее время методикам при оценке остаточного ресурса ВГП при их экспертном обследовании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герике Б. Л., Герике П. Б. Оценка остаточного ресурса вентиляторов главного проветривания // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2014. № 1. С. 47–49.

2. Герике Б. Л., Шахманов В. Н. Мониторинг технического состояния шахтных вентиляторов главного проветривания по параметрам механических колебаний // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. трудов IV Междунар. науч.-техн. конф. Прокопьевск, 2014. С. 278–282.

3. Иващенко Е. П., Марченко А. Ю., Юдкин Б. Ю., Марченко М. Ю., Салтанов С. Н., Баринов И. М., Викулов Е. А. Расчетная оценка ресурса вентиляторов главного проветривания // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. 2015. Т. 1. С. 234–238.

4. Li-Ping Shi, Li Han, Ke-Wu Wang, Chuan-Juan Zhang. Mine ventilator fault diagnosis based on information fusion technique // Procedia Earth and Planetary Science. 2009. Vol. 1. Issue 1. P. 1484–1488.

5. Rusinski E., Czmochowski J., Moczko P., Pietrusiak D. Monitoring and testing of high power industrial fans vibration // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. P. 2190–2195.

6. Pang Zhenan, Sheng Si Xiao, Hu Chan-Hua, Zhang Jianxun, Pei Hong. A review on modeling and analysis of accelerated degradation data for reliability assessment // Microelectronics Reliability. 2020. Vol. 107. 113602.

7. Беренов Д. И. Расчеты деталей на прочность. М.: Машгиз, 1959. 316 с.

8. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

9. Красюк А. М., Косых П. В. К расчету изгибных колебаний вала ротора осевого вентилятора главного проветривания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 3. С. 80–89.

10. Иващенко Е. П., Марченко А. Ю., Юдкин Б. Ю., Марченко М. Ю., Салтанов С. Н., Баринов И. М., Викулов Е. А. К вопросу расчетов первой критической частоты вращения валов вентиляторов главного проветривания // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. 2015. Т. 1. С. 228–233.

11. Andries J. H. Nel, Deon C. Arndt, Jan C. Vosloo, Marc J. Mathews. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South Africa // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 232. P. 379–390.

12. Гендлер С. Г., Нгуен Т. Ха. Обоснование рациональных способов обеспечения воздухом выемочных участков действующих угольных шахт Вьетнама при углублении горных работ // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 652–657.

Поступила в редакцию 8 июня 2020 года

Сведения об авторах:

Копачев Валерий Феликсович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: u1331@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-102-108

Rationale for main fans service life in the conditions of changing load

Valerii F. Kopachev[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aim *is to study basic regularities in functional condition change of main fans included in the configuration of main mine ventilation installations depending on the technological service conditions. The research also aims to determine the standard service life of main fans with the account of the differential analysis of the destructive factors, structural features, intensity and modes of operation of ventilation plants.*

Research methodology. *Based on the analysis of main fan installations structure and differential analysis of technological factors affecting the functional efficiency of main fans, a mathematical model has been proposed which determines the standard and residual life of the main fan with the account of the changing load.*
Results and analysis. *As a result of studying the impact of destructive factors on the main functional parts of the main fan, an equation has been proposed, which takes into account the physical properties of the material the fan elements are made of together with the quantitative effect of the external physical factors on the machine's operation. Research results show that the resource of the main fans should be determined based on the useful life of the machine's major component, i.e. mainshaft, with the account of the machine's operation mode.*
Conclusions and scope of results. *Circuit designs of mine ventilation plants predetermine the main fans service life. The service life should be established at the stage of the detail design with the account of the differential analysis of the destructive factors, structural features, intensity and operation modes of ventilation plants. The proposed methodology for main mine fans residual life determination is applied in expert organizations and Guidances on the determination of residual life of main mine fans which operate under the excess of the standard service life. The methodology may also be applied by project organizations to determine the design service life for the constructed main ventilation installations.*

Key words: *fan; main ventilation installation; residual life; reliability analysis; main fan; mathematical simulation; fan layout diagrams; fans operation.*

REFERENCES

1. Gerike B. L., Gerike P. B. Main fans residual life assessment. In: *Knowledge intensive technologies of mineral development and exploitation*. 2014; 1: 47–49. (In Russ.)
2. Gerike B. L., Shakhmanov V. N. Main mine fans technical condition monitoring by the parameters of mechanical oscillations. In: *The prospects of Russian coal mining regions innovative development: proceedings of 4th International science to practice conf*. Prokopyevsk; 2014. p. 278–282. (In Russ.)
3. Ivashchenko E. P., Marchenko A. Iu., Iudkin B. Iu., Marchenko M. Iu., Saltanov S. N., Barinov I. M., Vikulov E. A. Estimation of the main fan service life. In: *Current issues of improving the efficiency and safety of mining and oilfield equipment operation*. 2015; 1: 234–238. (In Russ.)
4. Li-Ping Shi, Li Han, Ke-Wu Wang, Chuan-Juan Zhang. Mine ventilator fault diagnosis based on information fusion technique. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2009; 1(1): 1484–1488.
5. Rusinski E., Czmochowski J., Moczko P., Pietrusiak D. Monitoring and testing of high power industrial fans vibration. *Procedia Engineering*. 2017; 199: 2190–2195.
6. Pang Zhenan, Sheng Si Xiao, Hu Chan-Hua, Zhang Jianxun, Pei Hong. A review on modeling and analysis of accelerated degradation data for reliability assessment. *Microelectronics Reliability*. 2020; 107: 113602.
7. Berenov D. I. *Stress analysis of the component parts*. Moscow: Mashgiz Publishing; 1959. (In Russ.)
8. Serensen S. V., Kogaev V. P., Shneiderovich R. M. *The bearing capacity and stress analysis of machine elements*. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1975. (In Russ.)
9. Krasiuk A. M., Kosykh P. V. Calculating bending vibrations of main axial mine fan rotor shaft. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2016; 3: 80–89. (In Russ.)
10. Ivashchenko E. P., Marchenko A. Iu., Iudkin B. Iu., Marchenko M. Iu., Saltanov S. N., Barinov I. M., Vikulov E. A. Regarding the issue of calculating the first torsional critical speed of shafts in main fans. In: *Current issues of improving the efficiency and safety of mining and oilfield equipment operation*. 2015; 1: 228–233. (In Russ.)
11. Andries J. H. Nel, Deon C. Arndt, Jan C. Vosloo, Marc J. Mathews. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South Africa. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 232: 379–390.
12. Gendler S. G., Nguen T. Kha. Rationale for the rational means of providing excavation sites with air at the operating coal shafts of Vietnam as soon as mining goes deeper. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2018; 234: 652–657. (In Russ.)

Received 8 June 2020

Information about authors:

Valerii F. Kopachev – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of Engineering Mechanics Department, Ural State Mining University. E-mail: u1331@yandex.ru

Для цитирования: Копачев В. Ф. Обоснование срока службы вентиляторов главного проветривания в условиях переменной нагрузки // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 6. С. 102–108. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-102-108
For citation: Kopachev V. F. Rationale for main fans service life in the conditions of changing load. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 6: 102–108 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-102-108